

一种可有效降低运算代价的子阵级波束扫描的旁瓣抑制方法

胡航 刘伟会 吴群

(哈尔滨工业大学电子与信息技术研究院 哈尔滨 150001)

摘要: 在子阵级相控阵中, 对于多波束形成等很多应用, 需要在子阵级进行数字波束扫描。此时抑制扫描方向图的旁瓣是一个重要问题, 而其关键在于构造有效的子阵级加权网络。该文将整个阵列作为一个超阵、将每个子阵作为一个超元来考虑, 基于用超元方向图近似表示真实子阵方向图的处理思想, 使得构造加权网络所需要的各矩阵的维数由原来与阵元数相同降低为与子阵数相同, 从而可十分显著地降低运算代价; 而且可得到波束形状、宽度及增益均很接近的新的子阵方向图。该方法可在一定程度上抑制子阵级波束扫描后的阵列方向图旁瓣。仿真结果证明了其有效性。

关键词: 相控阵雷达; 子阵级波束扫描; 旁瓣抑制; 加权网络; 超元

中图分类号: TN958.92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)08-1867-05

A Kind of Sidelobe Suppression Approach with Effective Reduction of Computation Cost for Beam Scanning at Subarray Level

Hu Hang Liu Wei-hui Wu Qun

(School of Electronics and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In subarray level phased array, it requires digital beam scanning at subarray level in many applications, for instance, multiple beamforming. In this case, the suppression of pattern sidelobe is critical, and the key is construction of the weighting network at subarray level. This paper considers the whole array as a super array and each subarray as a super element. Based on the concept adopting super element patterns to express approximately original subarray patterns, the dimension of each matrix which is required for constructing weighting network could reduce to the same value as subarray numbers of the array compared to the original value equaling to element numbers. Consequently, the computation cost is remarkably reduced. And all the obtained new subarray patterns are quite similar in forms, widths and gains of mainbeams. For subarray level beam scanning, the proposed approach could reduce sidelobe of array pattern to certain extent. Simulation results demonstrate its validity.

Key words: Phased array radar; Beam scanning at subarray level; Sidelobe suppression; Weighting network; Super element

1 引言

在相控阵雷达特别是多功能相控阵雷达中, 阵列一般包含几百至几千个阵元, 因而通常采用子阵结构^[1]。此时必须采用子阵级阵列信号处理技术^[2,3], 它是相控阵雷达中的关键技术之一; 主要包括子阵级空间谱估计^[4]及子阵级 ADBF(自适应数字波束形成)^[5-7]等。

在子阵级相控阵中, 通常在阵元上采用模拟移相器控制阵列的波束指向^[1]。但在多波束形成等很多应用中, 需要在子阵级进一步进行数字扫描。但是, 在子阵级扫描中, 随着扫描方向偏离原来的波束指向, 阵列方向图的旁瓣电平会迅速升高; 扫描范围越大, 旁瓣升高越多。

因而子阵级扫描中, 抑制方向图的旁瓣是一个十分重要的问题。阵列方向图是各子阵方向图的合成; 一般情况下, 各子阵的大小和阵元数可能完全不同, 因而导致其方向图的形状和波束宽度相差很大, 从而使阵列方向图具有很高的旁瓣。

国内外对子阵级扫描的旁瓣抑制方法研究得很少。文献[8]通过引入加权网络并对子阵输出进行后处理, 构造出新的子阵方向图, 使得各子阵方向图的主波束趋于一致, 且旁瓣大大降低, 从而使波束扫描后的阵列方向图旁瓣得到了抑制。但是, 其求取加权网络的各矩阵维数与阵元数相同; 而平面相控阵的阵元数常常会达到数千的量级, 导致其运算量巨大。如何有效降低运算代价是实际应用中必须解决的问题。

本文将整个阵列作为一个超阵, 将每个子阵作

为一个超元来考虑, 每个超元由相应的相位中心与增益表示^[4]。在构造加权网络时, 对于由加权网络得到的新的子阵方向图, 用超元方向图来近似表示真实的子阵方向图; 这种简化处理使得求取加权网络的各矩阵维数与子阵数相同。通常, 子阵数为数十的量级; 因而与文献[8]相比, 可十分显著地降低运算代价。仿真结果表明, 其旁瓣抑制性能只有微小下降。

2 信号模型

设由 M 个全向阵元构成的平面相控阵位于 xoy 平面上, 其中第 1 个阵元位于坐标原点为参考阵元, 第 m ($m = 1, \dots, M$) 个阵元的坐标为 (x_m, y_m) 。阵元上的幅度加权用于抑制方向图的旁瓣; 波束指向由阵元上的移相器控制。用 (θ, φ) 表示仰角和方位角, 设阵列波束指向为 (θ_0, φ_0) 。

将阵列划分为 L 个子阵, 设其 $M \times L$ 维的子阵转换矩阵为 \mathbf{T} ^[4,5,9]。本文将整个阵列作为一个超阵, 将每个子阵作为一个超元来考虑, 每个超元位于子阵的相位中心处。对于第 l 个子阵, 设其沿 x 轴方向的子阵中心为 $\xi_{l,x}$, 沿 y 轴方向的子阵中心为 $\xi_{l,y}$, 增益为 g_l ^[4]。

考虑原始的子阵方向图。令 $u = \sin \theta \cos \varphi$, $v = \sin \theta \sin \varphi$, 设 $f_l(u, v)$ 为第 l 个子阵的方向图。令 $\mathbf{f}_{\text{sub}}(u, v) = [f_1(u, v), \dots, f_l(u, v), \dots, f_L(u, v)]^T$, 则有

$$\mathbf{f}_{\text{sub}}(u, v) = \mathbf{T}^H \mathbf{a}(u, v) \quad (1)$$

其中 $\mathbf{a}(u, v) = [a_1(u, v), \dots, a_m(u, v), \dots, a_M(u, v)]^T$, 而

$$a_m(u, v) = e^{j2\pi(x_m u + y_m v)/\lambda} \quad (2)$$

3 有效降低运算代价的子阵级波束扫描的旁瓣抑制方法

为抑制子阵级波束扫描后升高的旁瓣电平, 可利用加权网络对子阵输出进行后处理, 以得到新的子阵方向图。希望通过加权网络进行处理后, 使各子阵方向图应趋于一致, 且旁瓣电平能够被抑制。

文献[8]给出一种期望子阵方向图的形式, 它是一种理想的空域滤波器。令 $u_0 = \sin \theta_0 \cos \varphi_0$, $v_0 = \sin \theta_0 \sin \varphi_0$, 则其期望的第 l 个子阵的方向图为

$$f_{\text{des}_l}(u, v) = G_{D_s}(u - u_0, v - v_0) e^{j2\pi[\xi_{l,x}(u - u_0) + \xi_{l,y}(v - v_0)]/\lambda} \quad (3)$$

其中

$$G_{D_s}(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in [(-u_C, u_C) \cap (-v_C, v_C)] \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

可见这种子阵方向图的幅度特性在位于主波束

内为常数; 而在主波束外为 0, 即没有旁瓣; 其中 u_C 和 v_C 用于调整波束宽度。

将加权网络 \mathbf{W}_{sub} 表示为 $\mathbf{W}_{\text{sub}} = (\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_l, \dots, \mathbf{w}_L)$, 其中 \mathbf{w}_l 为一个 L 维列向量。经加权网络处理后, 得到的新的第 l 个子阵的方向图为

$$f_{\text{new}_l}(u, v) = \mathbf{w}_l^H \mathbf{f}_{\text{sub}}(u, v) \quad (4)$$

文献[8]中, 构造 \mathbf{W}_{sub} 的出发点是使

$$Y_l = \int_V |f_{\text{new}_l}(u, v) - f_{\text{des}_l}(u, v)|^2 du dv \quad (5)$$

最小, 式中 $V = \{(u, v) \in [(-u_C, u_C) \cap (-v_C, v_C)]\}$ 。由此可得

$$\mathbf{W}_{\text{sub}} = (\mathbf{T}^H \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^H \mathbf{C}^{-1} \mathbf{V} \quad (6)$$

式中

$$\mathbf{C} = \int_V \mathbf{a}(u, v) \mathbf{a}(u, v)^H du dv \quad (7)$$

而

$$\mathbf{V} = (\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_l, \dots, \mathbf{v}_L) \quad (8)$$

其中 $\mathbf{v}_l = (v_{1,l}, \dots, v_{m,l}, \dots, v_{M,l})^T$, 且

$$v_{m,l} = A_{m,l} \cdot \text{sinc}\left[2\pi u_C (x_m - \xi_{l,x})/\lambda\right] \cdot \text{sinc}\left[2\pi v_C (y_m - \xi_{l,y})/\lambda\right] \quad (9)$$

而

$$A_{m,l} = e^{j2\pi(x_m u_0 + y_m v_0)/\lambda} \cdot e^{-j2\pi[(x_m - \xi_{l,x})u_0 + (y_m - \xi_{l,y})v_0]/\lambda} / (u_C v_C)$$

式(6)中, \mathbf{T} 和 \mathbf{V} 为 $M \times L$ 维矩阵, \mathbf{C} 为 $M \times M$ 维矩阵。 M 常常达到数千的数量级, 因而求解 \mathbf{W}_{sub} 的运算量巨大, 为此研究降低运算代价的方法十分必要。

本文给出另一种方法; 它将式(4)中由加权网络得到的新的子阵方向图表示为一种简化形式, 即对 $\mathbf{f}_{\text{sub}}(u, v)$ 进行近似表示。为此, 引入

$$\mathbf{A}_{\text{super}}(u_0, v_0) = \text{diag}\left(e^{j2\pi(\xi_{l,x}u_0 + \xi_{l,y}v_0)/\lambda}\right)_{l=1, \dots, L} \quad (10)$$

$$\mathbf{G}_{\text{super}} = \text{diag}(g_l)_{l=1, \dots, L} \quad (11)$$

并设

$$\mathbf{B}_{\text{super}} = \mathbf{A}_{\text{super}}(u_0, v_0)^H \mathbf{G}_{\text{super}} \quad (12)$$

令

$$\mathbf{a}_{\text{super}}(u, v) = [a_{\text{super}_1}(u, v), \dots, a_{\text{super}_l}(u, v), \dots, a_{\text{super}_L}(u, v)]^T \quad (13)$$

其中 $a_{\text{super}_l}(u, v) = e^{j2\pi(\xi_{l,x}u + \xi_{l,y}v)/\lambda}$ 。再定义

$$\mathbf{f}'_{\text{sub}}(u, v) = \mathbf{B}_{\text{super}} \mathbf{a}_{\text{super}}(u, v) \quad (14)$$

并设 $\mathbf{f}'_{\text{sub}}(u, v) = [f'_1(u, v), \dots, f'_l(u, v), \dots, f'_L(u, v)]^T$ 。将式(12)和式(13)代入式(14)中, 可得

$$f'_l(u, v) = g_l e^{j2\pi[\xi_{l,x}(u - u_0) + \xi_{l,y}(v - v_0)]/\lambda} \quad (15)$$

这里, $\mathbf{f}'_{\text{sub}}(u, v)$ 是用超元的方向图来近似表示真实

的子阵方向图。

下面采用具有低运算代价的加权网络 \mathbf{W}'_{sub} , 并将其表示为 $\mathbf{W}'_{\text{sub}} = (\mathbf{w}'_1, \dots, \mathbf{w}'_l, \dots, \mathbf{w}'_L)$ 。由 \mathbf{W}'_{sub} 得到的新的子阵方向图为

$$\mathbf{f}'_{\text{new}_l}(u, v) = (\mathbf{w}'_l)^H \mathbf{f}_{\text{sub}}(u, v) \quad (16)$$

用 $\mathbf{f}'_{\text{sub}}(u, v)$ 对 $\mathbf{f}_{\text{sub}}(u, v)$ 进行近似, 得到 $\mathbf{f}'_{\text{new}_l}(u, v)$ 的近似形式为

$$\mathbf{f}'_{\text{new}_l}(u, v) \approx (\mathbf{w}'_l)^H \mathbf{f}'_{\text{sub}}(u, v) \quad (17)$$

考虑式(14), 有

$$\mathbf{f}'_{\text{new}_l}(u, v) \approx (\mathbf{w}'_l)^H \mathbf{B}_{\text{super}} \mathbf{a}_{\text{super}}(u, v) \quad (18)$$

从而, 将式(5)所示的目标函数修正为

$$Y'_l = \int_V \left| \mathbf{f}'_{\text{new}_l}(u, v) - \mathbf{f}_{\text{des}_l}(u, v) \right|^2 \mathrm{d}u \mathrm{d}v \quad (19)$$

由式(18)和式(19)可得

$$\begin{aligned} Y'_l &= (\mathbf{w}'_l)^H \mathbf{B}_{\text{super}} \mathbf{C}_{\text{super}} \mathbf{B}_{\text{super}}^H \mathbf{w}'_l \\ &\quad + \int_V \left| \mathbf{f}_{\text{des}_l}(u, v) \right|^2 \mathrm{d}u \mathrm{d}v - (\mathbf{w}'_l)^H \mathbf{B}_{\text{super}} \mathbf{v}'_l \\ &\quad - (\mathbf{v}'_l)^H \mathbf{B}_{\text{super}}^H \mathbf{w}'_l \end{aligned} \quad (20)$$

式中

$$\mathbf{C}_{\text{super}} = \int_V \mathbf{a}_{\text{super}}(u, v) \mathbf{a}_{\text{super}}^H(u, v) \mathrm{d}u \mathrm{d}v \quad (21)$$

而 $\mathbf{v}'_l = (v'_{1,l}, \dots, v'_{n,l}, \dots, v'_{L,l})^T$, 其中 $n = 1, \dots, L$; 且有

$$\begin{aligned} v'_{n,l} &= \int_V \left| \mathbf{f}_{\text{des}_l}(u, v) \right| e^{j2\pi[(\xi_{n,x} - \xi_{l,x})u + (\xi_{n,y} - \xi_{l,y})v] / \lambda} \mathrm{d}u \mathrm{d}v \\ &= e^{j2\pi(\xi_{n,x}u_0 + \xi_{n,y}v_0) / \lambda} \\ &\quad \cdot \left[\int_{-v_C}^{v_C} \left(\int_{-u_C}^{u_C} e^{j2\pi[(\xi_{n,x} - \xi_{l,x})(u - u_0) + (\xi_{n,y} - \xi_{l,y})(v - v_0)] / \lambda} \mathrm{d}u \right) \mathrm{d}v \right] \\ &= e^{j2\pi(\xi_{n,x}u_0 + \xi_{n,y}v_0) / \lambda} \left[\int_{-u_C}^{u_C} e^{j2\pi(\xi_{n,x} - \xi_{l,x})(u - u_0) / \lambda} \mathrm{d}u \right] \\ &\quad \cdot \left[\int_{-v_C}^{v_C} e^{j2\pi(\xi_{n,y} - \xi_{l,y})(v - v_0) / \lambda} \mathrm{d}v \right] \\ &= A'_{n,l} \cdot \text{sinc} \left[2\pi u_C (\xi_{n,x} - \xi_{l,x}) / \lambda \right] \\ &\quad \cdot \text{sinc} \left[2\pi v_C (\xi_{n,y} - \xi_{l,y}) / \lambda \right] \end{aligned} \quad (22)$$

且

$$A'_{n,l} = e^{j2\pi(\xi_{n,x}u_0 + \xi_{n,y}v_0) / \lambda} \cdot e^{-j2\pi[(\xi_{n,x} - \xi_{l,x})u_0 + (\xi_{n,y} - \xi_{l,y})v_0] / \lambda} / (u_C v_C)$$

令 $\partial Y'_l / \partial \mathbf{w}'_l = \mathbf{0}$, 则由式(20)可得

$$\mathbf{w}'_l = (\mathbf{B}_{\text{super}} \mathbf{B}_{\text{super}}^H)^{-1} \mathbf{B}_{\text{super}} (\mathbf{C}_{\text{super}})^{-1} \mathbf{v}'_l \quad (23)$$

设

$$\mathbf{V}_{\text{super}} = (\mathbf{v}'_1, \dots, \mathbf{v}'_l, \dots, \mathbf{v}'_L) \quad (24)$$

因而

$$\mathbf{W}'_{\text{sub}} = (\mathbf{B}_{\text{super}} \mathbf{B}_{\text{super}}^H)^{-1} \mathbf{B}_{\text{super}} (\mathbf{C}_{\text{super}})^{-1} \mathbf{V}_{\text{super}} \quad (25)$$

式(25)中, $\mathbf{B}_{\text{super}}$, $\mathbf{C}_{\text{super}}$ 和 $\mathbf{V}_{\text{super}}$ 均为 $L \times L$ 维矩阵; 通常 L 只有几十的数量级, 因而求解 \mathbf{W}'_{sub} 与求解

\mathbf{W}_{sub} 相比, 运算量得到了十分显著的降低。

4 模拟仿真

设平面阵包含有 32×34 个阵元, 放置于 xoy 平面的矩形网格内, x 和 y 方向的阵元间距均为 $\lambda/2$ 。阵列在 x 和 y 方向均采用 -40dB Taylor 加权。阵列被划分为 6×6 个子阵, 各子阵均为矩形阵; 其中 x 方向各子阵的阵元数分别为 $[7 \ 6 \ 3 \ 2 \ 5 \ 9]$, y 方向各子阵的阵元数分别为 $[8 \ 5 \ 2 \ 4 \ 6 \ 9]$ 。设 $(u_0, v_0) = (-0.5, 0)$, u_C 和 v_C 分别取为 1.15 BW 和 0.38 BW , 其中 BW 为 3 dB 波束宽度。

4.1 子阵方向图

图1给出了不同方法得到的子阵方向图(方位面和俯仰面)。其中图1(a)为原始的子阵方向图, 可见由于各子阵的大小和阵元数不同, 因而不同方向图之间的形状和波束宽度相差很大。图1(b)为由文献[8]方法得到的方向图, 可见此时不同的子阵方向图在主波束内趋于一致, 其波束宽度、波束形状及增益很接近; 且旁瓣电平得到了很有效的抑制。图1(c)给出了本文方法得到的方向图, 可见其与图1(b)是十分接近的; 图1(c)中, 不同方向图的主波束形状、波束宽度及增益也非常接近, 旁瓣电平也得到了很有效的抑制; 但与图1(b)相比, 不同方向图波束形状及增益的一致性性能有很微小的下降。

4.2 子阵级波束扫描的旁瓣抑制效果

图2给出了子阵级波束扫描的阵列方向图的仿真结果, 其中波束扫描是沿 u 方向上进行的。图2(a), 2(b)和2(c)分别为未经加权网络处理, 文献[8]方法及本文方法得到的方向图, 而每个图中分别给出了不扫描、扫描范围分别为 0.5 BW 和 1.0 BW 等3种情况。将图2(b), 2(c)与图2(a)进行比较, 可见与不采用加权网络相比, 文献[8]方法与本文方法均可使扫描后的方向图旁瓣得到一定的抑制。

图2中, 扫描后各方向图的旁瓣电平如表1所示。可见, 对于扫描 0.5 BW 的情况, 本文方法与不采用加权网络相比, 旁瓣抑制了 1.23 dB ; 而与文献[8]方法相比, 其旁瓣只损失了 0.11 dB 。当波束扫描 1.0 BW 时, 本文方法使旁瓣抑制了 1.45 dB ; 与文献[8]方法相比, 只损失了 0.27 dB 。

5 结束语

(1) 本文方法中, 构造加权网络所涉及各矩阵的维数只与子阵数相同; 与文献[8]中各矩阵维数与阵元数相同的情况相比, 可十分显著地降低运算代价。这对实际应用尤为有利。

(2) 在构造加权网络时, 用超元方向图近似表示原始的子阵方向图, 可得到波束形状、宽度及增益

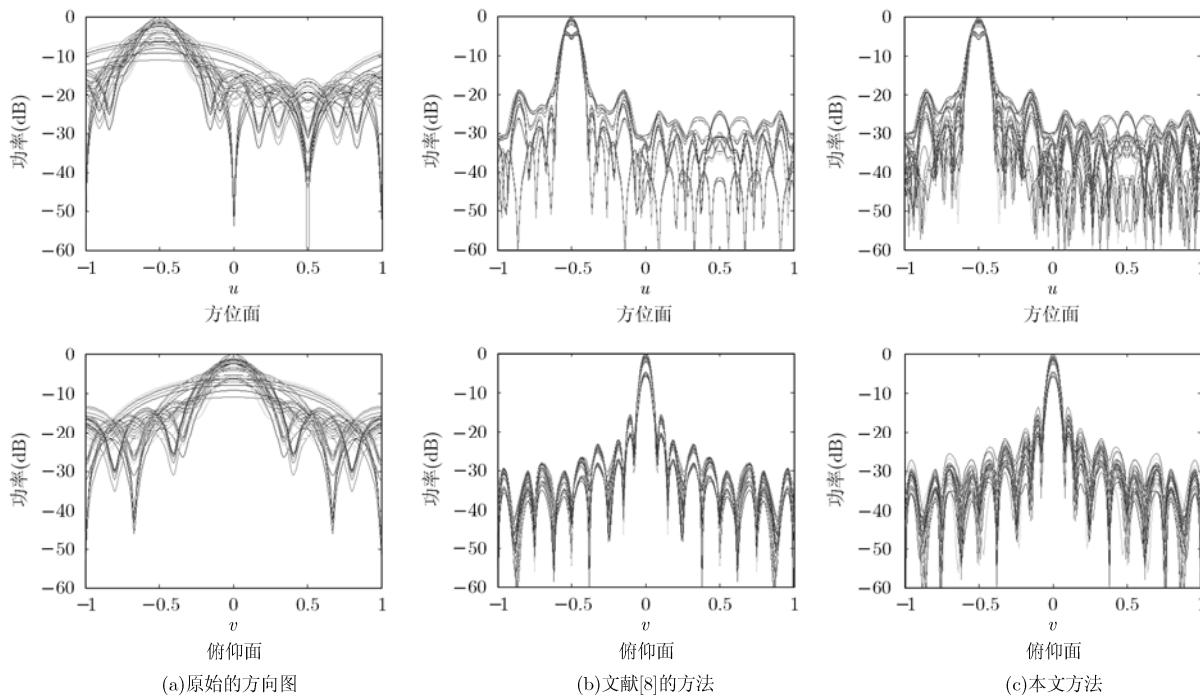


图1 不同方法得到的子阵方向图

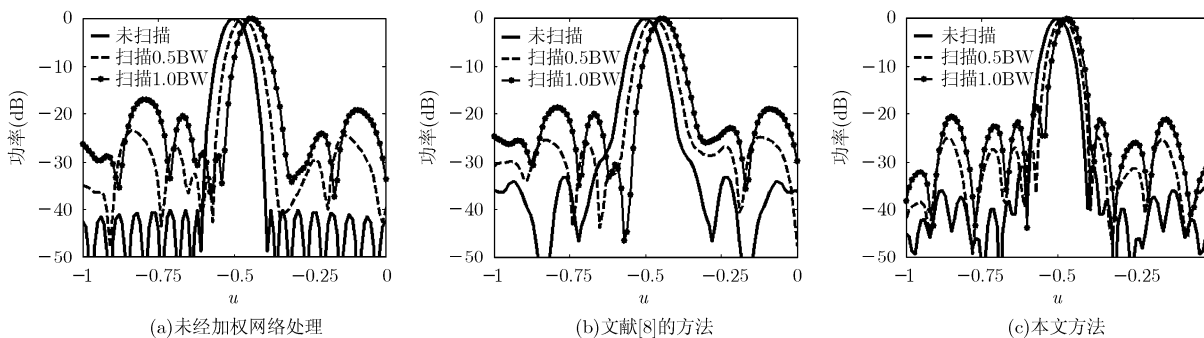


图2 3种方法的子阵级波束扫描方向图(方位面)

均非常接近的各个新的子阵方向图。

(3) 本文方法可在一定程度上抑制子阵级波束扫描的方向图旁瓣。与文献[8]的方法相比，其旁瓣抑制性能只有很微小的下降。

表1 子阵级波束扫描后的方向图旁瓣(dB)

| 扫描范围 (BW) | 不采用加权网络 | 文献[8]方法 | | 本文方法 | |
|-----------|---------|---------|------|--------|------|
| | | 旁瓣电平 | 改善值 | 旁瓣电平 | 改善值 |
| 0.5 | -23.48 | -24.82 | 1.34 | -24.71 | 1.23 |
| 1.0 | -16.99 | -18.71 | 1.72 | -18.44 | 1.45 |

(4) 从仿真结果看，对于通过引入加权网络来抑制扫描方向图旁瓣的这类方法，其旁瓣抑制效果并不十分显著，但这可能是目前唯一可行的方法。

(5) 如何提高旁瓣抑制性能需要进一步研究，途

径之一是构造更为有效的期望子阵方向图形式。

参考文献

- [1] Nickel U. Subarray configurations for digital beamforming with low sidelobes and adaptive interference suppression [C]. Proc. IEEE International Radar Conference, Alexandria, USA, 1995: 714-719.
- [2] Nickel U. Super-Resolution and Jammer Suppression with Broadband Arrays for Multi-function Radar [M]. In "Applications of Space-Time Adaptive Processing", Chapt 16, R.Klemm(ed), IEE Press, 2004: 543-599.
- [3] Hu Hang and Qin Wei-cheng. Research on subarray partitioning of planar phased array with adaptive digital beamforming[C]. Proc. IEEE MAPE'2007, Beijing, China, 2007: 691-694.
- [4] 胡航, 景秀伟. 二维子阵级相控阵空间谱估计方法[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 415-419.
Hu Hang and Jing Xiu-wei. 2-D spatial spectrum estimation

- methods at subarray level for phased array[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 415-419.
- [5] 胡航, 邓新红. 二维子阵级ADBF及方向图控制方法研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(4): 881-884.
Hu Hang and Deng Xin-hong. Study on the two-dimensional ADBF at subarray level and pattern control method[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(4): 881-884.
- [6] 胡航, 邓新红. 子阵级平面相控阵 ADBF 的旁瓣抑制方法[J]. 电波科学学报, 2008, 23(1): 201-205.
Hu Hang and Deng Xin-hong. The sidelobe suppression method for ADBF at subarray level with planar phased array[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(1): 201-205.
- [7] 胡航, 李绍滨. 重叠子阵平面相控阵ADBF的方向图控制[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(12): 2001-2005.
Hu Hang and Li Shao-bin. The pattern control for planar phased array ADBF with overlapped subarrays[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(12): 2001-2005.
- [8] Nickel U. Properties of digital beamforming with subarrays [C]. Proc. International Conference on Radar, Beijing, China, 2006: 331-335.
- [9] Farina A, Golino G, and Immediata S, *et al.* Techniques to design sub-arrays for radar antennas[C]. Proc. International Conference on Antennas and Propagation, Exeter, England, 2003: 17-23.
- 胡 航: 男, 1968 年生, 博士, 硕士生导师, 研究领域为阵列信号处理技术在相控阵雷达系统中的应用.
- 刘伟会: 男, 1982 年生, 硕士生, 研究方向为阵列信号处理.
- 吴 群: 男, 1955 年生, 博士, 教授, 研究方向为毫米波相控阵天线、电磁兼容、RF MEMS 器件.